

**Beszámoló a
„Környezeti folyamatok modellezése „Soft Computing” módszerekkel”
témájú OTKA T43177 kutatásról**

Témavezető: Dr. Bulla Miklós

A kutatás célja

A környezetállapot-értékelés (KÁÉ) a környezetgazdálkodás része, melynek célja, hogy a környezeti médiumokban és rendszerekben (a talajban, vízben, levegőben) végbemenő folyamatok megismerhetők, leírhatók, így a hatások számíthatóak és prognosztizálhatók legyenek. A környezet állapotának értékelése, állapotváltozásának prognosztizálása a fenntartható fejlődés szempontjából kulcsfontosságú. A környezetállapot felmérésének, értékelésének és minősítésének hagyományos módszerei (mintavételezésen alapuló eljárások), nem teszik lehetővé sem a változásokat kiváltó okok tanulmányozását, sem pedig a jövőbeli állapotváltozás előrejelzését.

Szükség van egy átfogó KÁÉ szakértői rendszerre, amelynek segítségével a környezetállapot-változások, valamint az okszerű megelőzés hatása modellezhető (beleértve a jogi és gazdasági szabályozás hatását is). A környezeti hatások így előre jelezhetők, a szükséges beavatkozások és várható költségeik pedig számíthatók. Ez a szakértői rendszer támogatná környezeti hatásvizsgálatok végzését, kiértékelését, és az egyes immisszió-csökkentést célzó szabályozási alternatívák kidolgozását, tesztelését.

A környezeti folyamatok összetettsége, és nemlineáris volta miatt tanulmányozásukhoz adekvát modellek szükségesek. Az ún. soft computing módszerek (rács alapú celluláris neurális hálózatok és fuzzy szabályok) a környezeti folyamatok modellezésének ígéretes eszközei. A korszerű módszerek alkalmazása mellett a szakértői rendszer kidolgozásához nagyfokú interdiszciplináris kollaboráció is szükséges (ökológusok, kémikusok informatikusok, matematikusok, közgazdászok bevonásával).

A környezet állapotának változásai szorosan összefüggnek a transzportfolyamatokkal, a szennyezőanyag-transzport nyomon követése a környezetállapot-értékelés egyik legfontosabb alapproblémája. A szennyezőanyag-transzport modellezése hagyományosan parciális differenciálegyenletekkel történik. Az egyenletek megoldásának gyakorlati feltétele az eredetileg folytonos probléma időben és térben való diszkretizálása. A szennyező anyagok transzportja egyaránt tartalmazhat advekciós, diszperziós valamint bomlási folyamatokat, ezen kívül biokémiai transzformációkat is. Elvileg sem lehetséges olyan mérő, megfigyelő rendszer létrehozása, amely a tér minden pontjára teljes mértékben reprezentatív információkat szolgáltat az állapot értékelésére választott paramétereikről. Mindezek miatt a parciális differenciálegyenletekkel való modellezés mind a modell teljes meghatározottsága,

mind pedig a számítási bonyolultság szempontjából megoldhatatlan, illetve kezelhetetlen problémákhoz vezethet. Mindezek mellett a mérések, adatgyűjtések, vizsgálatok költségei igen magasak, és egyidejűleg a valós időben általában nem is lehetségesek.

Ennek nagyon összetett problémának megoldására lehetőséget kínálnak a celluláris neurális hálózatok (CNN), melyek alkalmazhatók a felmerülő parciális differenciálegyenletek közelítő megoldására – a CNN architektúrával kapcsolatos kutatások egyik legperspektivikusabb iránya éppen a parciális differenciálegyenletek modellezését és megoldását célozza.

A környezetgazdálkodási problémák modellezésére a celluláris neurális hálózatok alkalmasnak ígérkeznek. A környezeti paraméterek a modell egy-egy rétegének feleltethető meg, az egyes rétegekben alkalmazott hely- és időfüggő template-mátrixok és additív konstansok pedig az egyes rétegbeli transzportfolyamatokat írják le, figyelembe véve az egyes rétegek közötti kölcsönhatásokat is.

A regionális léptékű környezetgazdálkodás a környezet állapotát leíró állapotjellemzőkhöz kapcsolódó komplex fuzzy optimalizálási problémákat tartalmaz. A probléma tanulmányozásában tehát a fuzzy szabály alapú technológiák jól használhatóak. A nagyon nagy bonyolultságú rendszerekre sikerrel alkalmazott hierarchikus strukturált bázisos technikákat és strukturált fuzzy modelleket érdemes alkalmazni.

A soft computing módszerek környezeti rendszerekre való alkalmazásában az alábbi célokat tűztük ki:

- a komplex környezetállapot-értékelésben eddig elért eredmények összefoglalása, a lehetőségek és a nehézségek felmérése;
- transzport-folyamatokat leíró modellek vizsgálata, szennyezések terjedésében való alkalmazási lehetőségük feltárása, megoldásukat segítő numerikus módszerek keresése;
- a környezeti médiumok, mint alrendszerek vizsgálatában CNN alkalmazhatóságának vizsgálata, összevetése más módszerekkel;
- fuzzy szabályrendszerek kidolgozása a környezetállapot-értékelő döntéstámogató rendszerek megalapozásként, a fuzzy modellek alkalmazhatóságának és a neurális hálózatokkal való implementálásának kutatása;

A kutatás menete

A kutatás kezdetén számba vettük a környezetállapot-értékelést támogató, korszerű matematikai alapokon nyugvó szakértői rendszerrel szemben támasztott legfontosabb követelményeket.

Létrehoztunk egy általános celluláris neuronhálózat (CNN) modellt szennyeződések terjedésének vizsgálatára [1], amely bővítve, konkrét esetekhez igazítva és tesztelve alapját

képezheti egy hatékony döntéstámogató rendszer létrehozásának.

A rendszer finomítása érdekében a környezeti rendszer egyes komponenseiben zajló folyamatokat is megvizsgáltuk. A folyadék és gázáramlás áramlás modelljei [6] és [7] fontos szerepet játszanak a talajban, vízben és levegőben lejátszódó környezeti folyamatok leírásában.

A kutatás irányát módosította, mintegy kiterjesztette a kutatás kezdetén – az OTKA iroda egyetértésével – a résztvevő kutatók személyében történt változtatás. Ezáltal a fuzzy és CNN módszerek mellett a neuronhálókkal rokon sejtautomaták vizsgálata is lehetségessé vált. A sejtautomaták különösen eredményes modellezési eszköznek bizonyultak az élő környezet modellezésében.

A környezeti folyamatok legösszetettebb legtöbb komponensből álló alrendszere az élővilágban játszódik. Az „élővilág alrendszerben” megvizsgáltuk a zavarás (élőhely vesztés, invázió fajok) hatását a populáció szintű folyamatokra sejtautomata modellek és szimulációk segítségével. Kimutattuk hogy az élőhelyek számának csökkenésével a fajok közötti versenyben az invázió (gyom jellegű) fajok előnyösebb helyzetbe kerülnek [4]. A különböző irtási stratégiák összehasonlításával kiderült, hogy az invázió fajok visszaszorításának sikeressége a kolonizációs képességük visszaszorításán múlik [2].

A sejtautomata szimulációk alapján statisztikailag kimutatható módon igazoltuk a térbeli aggregáció hatását két hasonló versengő faj kölcsönhatására. Az interspecifikus aggregáció következtében a gyengébb kompetitor látszólagos fennmaradása hosszú ideig elhúzódhat [3]. Ez az eredmény közvetlenül is alkalmazható fajok védelmére irányuló természetvédelmi kezelések tervezésében.

A kutatás második évében elkészült és könyv alakban kiadásra került a komplex környezetállapot-értékelő szakértői rendszerek metodikai fejlesztésének tapasztalatait összefoglaló tanulmánygyűjtemény [8]. Meghatároztuk az integrált, komplex modell létrehozását leíró alapelveket, valamint elkészítettük a lehetséges megközelítések és az egyes részrendszerek modelljeire vonatkozó kísérleteink összefoglalóját. Korábbi eredményeink alapján a környezeti modellek integrált rendszere szempontjából ígéretesnek látszik az elemekből álló rendszerek (neuronhálózatok (CNN), sejtautomaták (CA) és fuzzy szabályok) által kínált szimulációs megközelítés [8, 5].

Eddigi tapasztalatainkat nemcsak hazai körben, hanem egy világkörű előadói körút keretében ismertettük neves egyetemeken (1. táblázat).

1. táblázat Az előadássorozat állomásai

Dátum	Helyszín	Előadó	Előadás címe
2004. 01	Nanyang University, Singapore	Bulla Miklós	Environmental Processes
2004. 02	Australian National University. Department of Computer Science of the Faculty of Engineering and Information Technology, Canberra	Bulla Miklós	Environmental Engineering. Modeling of Environmetal Processes
2004. 02	New Zealand Summerschool of Bioinformatics	Bulla Miklós	Environmental Applications
2004. 02	State University California	Bulla Miklós	Modeling of Environmental Processes. Incentives of Soft Computing

Megvizsgáltuk a különböző modellezési módszerek (CNN, fuzzy szabálybázisú rendszerek, sejtautomaták) környezetállapot-értékelésben való használhatóságát [9, 10].

A környezeti modellek bonyolultsága és szimulációjuk (pl. nagy sebesség-igényű CNN számítások) speciális, FIFO orientált processzor architektúrák kidolgozását teszi szükségessé. Ilyen processzorok nagyszámú cellát implementálhatnak, így a környezeti modellekhez szükséges finomabb felbontást szolgálják.

Olyan VHDL csomagot fejlesztettünk ki, amely lehetővé teszi a FIFO cellák optimális megoldásának, a kapacitív tároláson alapuló flip-flopnak az alkalmazását [11]. A csomag alkalmazására került egy CNN tömb-processzor tranzisztor szintű modelljének felépítésénél és szimulációjánál.

A tervezett kutatási programnak megfelelően a 2005. évben kiemelt hangsúlyt kapott a transzport- és áramlási folyamatok modellezése. A modellek megfelelősége szempontjából kiemelt a közelítő numerikus módszerek fejlesztése [17, 23, 25]. A modellek optimalizációjában genetikusan algoritmusok használatát is vizsgáltuk [16].

A kutatás eddigi eredményei alapján kiderült, hogy a komplex környezetállapot-értékelést támogató egyetlen „meta-modell” helyett célszerűbb a környezeti médiumoknak megfelelő alrendszerek modellezése. Az alrendszer modelleket azonban úgy kell kialakítani, hogy egymással kölcsönhatásban álljanak, elemeik és a bennük mozgó szennyezés hatása a többi részrendszerben is követhető legyen [13]. Az ilyen, modulárisan felépülő modellrendszer további előnye, hogy az egyes médiumok a kezelésükre leginkább alkalmas modellekkel vizsgálhatók (pl. a talaj szennyezői CNN modellel, az élővilág sejtautomatákkal, a döntéstámogatás fuzzy szabályokon alapuló rendszerrel).

A kutatás utolsó évében az eredmények összefoglalására és a hasznosítására helyeztük a hangsúlyt.

Az élővilág modulban a természetes folyamatok között meghatározó szerepe van a fajok

közötti versengésnek. Mintázatok és versengés kölcsönhatásának részletes vizsgálatán kívül a az azokat leíró sejtautomata modelleket is elemeztük, igazoltuk, hogy a versengés vizsgálatában használt speciális sejtautomata modellek között létezik bistabilis [21].

A soft computing módszereken alapuló modellek környezetállapot-értékelést segítő rendszerekben való gyakorlati alkalmazhatóságát két környezeti médiumban is kipróbáltuk.

A természetes flórában az özönnövények (agresszíven terjedő idegenhonos fajok) terjedésükkel hasonló szennyezést okoznak, mint pl. a levegőben a mérgező gázok. Kiszorítják az őshonos fajokat, drasztikusan megváltoztatják az életközösséget. Az özönfajok terjedésének vizsgálatára létrehoztunk egy sejtautomata modellt, amelynek segítségével összehasonlíthatók a különböző irtási módszerek, prognosztizálható a sikerességük és a várható költségük [24].

A környezeti transzportfolyamatok egy konkrét alkalmazásaként megvizsgáltuk, hogy a gáz halmazállapotú szennyezőanyag kibocsátás hogyan oszlik el Győr belvárosának egy vizsgált darabjában, a geometriai viszonyokat (házakat, épületeket) és a szélirányt figyelembe véve [26, 27, 28].

A projekthez több kutatási program is kapcsolódik.

- A Széchenyi István Egyetem egyik kutatási főiránya, környezetgazdálkodási indikátorok kutatása, melyet a Nyugat-Magyarországi Egyetemmel, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemmel a Magyar Tudományos Akadémiával és a Budapesti Műszaki Főiskolával együttműködve végzünk.
- A regionális innovatív fejlesztések fenntarthatóságának vizsgálata FP6-os pályázat, melyben a nemzetközi konzorcium tagjaként egyetemünk feladata a regionális innovatív fejlesztések fenntarthatóságának vizsgálata.
- A Környezetállapot Értékelés Program („KÉP”), amely MTA–KvVM együttműködés keretében zajlik, a projekt vezetője Prof. Dr. habil Németh Tamás. Célja, olyan korszerű, informatikai alapokra épített szakértői rendszer fejlesztése, amely alkalmas a környezet állapotát érintő, tágabban a környezetet érő (káros) hatásokra bekövetkező állapotváltozások, és túl ezen: a hatások okait jelentő társadalmi, gazdasági, technológiai folyamatok összefüggéseit elemezni, a hazai monitoring adatok alapján. A KÉP projekt tehát ezen OTKA kutatás konkrét hazai alkalmazásának is tekinthető, alapjaiban támaszkodik ennek elméleti eredményeire.

A kutatás eredményei

- Összefoglaltuk a komplex környezetállapot-értékelésben korábban elért eredményeket, és megállapítottuk, hogy a hagyományos analitikus módszerek önmagukban nem alkalmasak hatékony, döntéstámogatásra is használható modellrendszer létrehozására

[4, 5, 8]

- Részletesen megvizsgáltuk a szennyezések transzportjának soft computing módszerekkel való megközelíthetőségét. Folyadék és gázáramlási modelleket hoztunk létre [11, 15, 22, 23], amelyek hatékony kezelésére új numerikus és szimulációs módszere fejlesztettünk [6, 7, 12, 16, 17, 25].
- Megmutattuk, hogy a környezetállapot-értékelésben használható komplex döntéstámogató modellrendszer megvalósítható úgy, hogy az egyes környezeti alrendszereket különböző, részben más soft computing módszereket alkalmazó modulokból építjük fel. Ez a szerkezet mind számítási időben, mind pedig közelítő pontosságban optimalizálhatóvá teszi a rendszert [5, 9, 20].
- Az élővilág, mint a környezeti alrendszerek között legbonyolultabb komponense szintén kezelhető számítógépes szimulációkkal támogatott módszerekkel. Megmutattuk, hogy sejtautomata modellekkel vizsgálhatók a természetvédelmi-állapotot meghatározó legfontosabb folyamatok. Létrehoztunk egy sejtautomata modellrendszert, amelynek segítségével vizsgálható a fajok közötti versengés, és rugalmasan beépíthetők a közvetlen és a többi környezeti médiumon keresztül ható humán eredetű hatások [1, 2, 3, 9, 14, 18, 21].
- Megtörtént egy fejlett numerikus szimulációs technológiákra épülő informatikai rendszer prototípusának megalkotása, mely tetszőleges úthálózatok gépjárműforgalmának, és a társult környezeti terhelés eloszlásának számítógépes modellezésére használható [26, 27, 28].

Ezen legfrissebb eredmények publikálása még nem történt meg, ezért a közlemények kéziratát az alábbiakban csatoljuk.

Publikálás előtt álló közlemények

[26] *Horváth Zoltán, Morauszki Tamás, Horváth András*: Helyi légáramlási viszonyok számítása Győrben

[27] *Keresztes Péter*: Szennyező-anyag transzportjának szimulációja CNN módszerrel

[28] *Csik Árpád*: Úthálózatok Gépjárműforgalmát és az Okozott Környezeti Terhelést Modellező Szimulációs Szoftvercsomag

Helyi légáramlási viszonyok számítása Győrben

Horváth Zoltán

SZE Matematika és Számítástudomány Tanszék

Morauszki Tamás

SZE Járműipari Regionális Tudásközpont

Horváth András

SZE Fizika és Kémia Tanszék

Kivonat. A szerzők tanulmányukban azt vizsgálják, hogy adott gáz halmazállapotú szennyezőanyag kibocsátás hogyan oszlik el Győr belvárosának egy vizsgált darabjában, a geometriai viszonyokat (házakat, épületeket) és a szélirányt figyelembe véve. Ennek lényege a HyperMesh és Tgrid nevű előkészítő szoftverek és a Fluent nevű áramlástan modellező szoftver használata. Megmutatják, hogyan kell előkészíteni a nyers CAD geometriát, mit kell megadni az áramlástan megoldó használatához és milyen eredmények várhatók az alkalmazott eljárástól.

1. fejezet. Bevezetés

Napjainkban a városok egyik legnagyobb problémája a levegő szennyezettsége. Ennek egyik legfontosabb kiváltó oka a gépjárművek okozta káros anyag kibocsátás, de sok városban fontos szempont az ipari üzemek által a levegőbe juttatott égéstermékek nagy mennyisége is. Az egészséges életkörülmények tervezéséhez vizsgálni kell, nem haladja-e meg a szennyező anyagok szintje a megadott egészségügyi hatóságok által meghatározott küszöbértéket.

A gáznemű káros anyag a levegőbe kerülve szétterjed, eloszlik, habár ezt a házak sok helyen megakadályozzák, vagy legalábbis erősen befolyásolják. Nagyon összetett folyamat annak végigkövetése, hogy egy adott ponton kibocsátott káros anyag merre terjed a térben, hiszen erre nagy hatással vannak a geometria viszonyok (épületek, természetes tárgyak) és az éppen azon a helyen uralkodó széljárás. Ehhez nyilván nem elegendő egy átlagos házméretet, vagy egy jellemző szélirányt és szélsébséget használni, hiszen ezek pontról pontra változhatnak, ezáltal jelentős hatást kifejtve a levegő és a káros anyag terjedésére.

Emiatt egy hiteles környezeti elemzéshez ismernünk kell pontról pontra a szél sebességét és irányát. Tipikusan annyit ismerünk, hogy néhány adott mérőhelyen mik ezek a mennyiségek; a többi helyen lévő szélviszonyt ebből kell meghatározni. Ezt a valóságban, minden útra, épületre méréssel megállapítani gyakorlatilag lehetetlen. Elképzelhető egy modell készítése és annak szélcsatornában történő bemérése, ami igen időigényes és költséges munka. Dolgozatunkban bemutatjuk, hogyan lehet Győr belvárosára vonatkoztatva a részletes, házak közötti széljárást kiszámítani számítógépes szimulációval. Hangsúlyozzuk, hogy ebben a tanulmányunkban a szélviszonyokat számítjuk a város határában mért (feltételezett) szélből és nem közvetlenül a káros anyag terjedését modellezzük; utóbbi egy további projekt feladata lehet.

Fenti feladatnak megfelelően a dolgozat felépítése a következő. A 2. fejezetben meghatározzuk a feladatot és vázoljuk megoldását, melyet a következő fejezetekben részletezünk: a 3. fejezetben bemutatjuk a geometriai előkészítést, a 4. fejezetben a számítógépes szimulációs számítás és az eredmények megjelenítésének menetét; az 5. fejezetben értékeljük a kapott mennyiségeket, míg a 6. fejezetben rámutatunk a projekt folytatásának lehetséges menetére, annak várható erőforrásigényét és várható eredményeit számba vesszük.

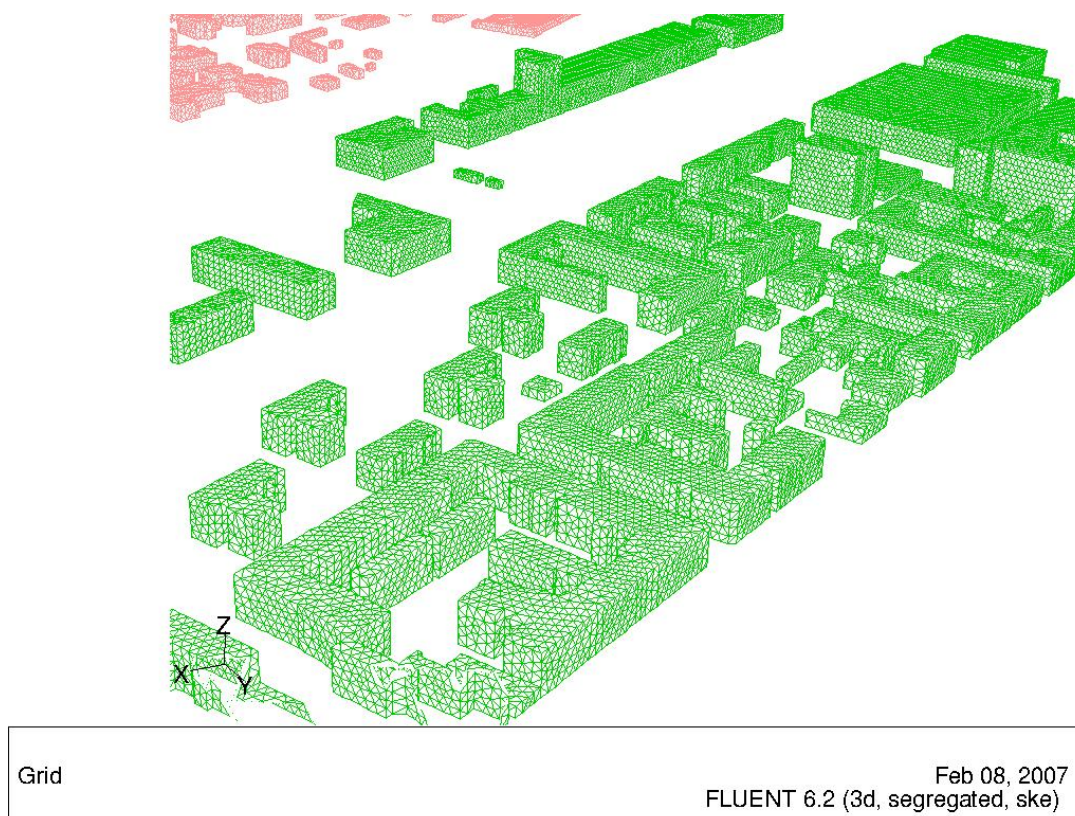
2. fejezet. A szimulációs feladat megfogalmazása és megoldásának menete

A bevezetésben mondtak szerint a feladatunk a következő: Győr városának egy meghatározott részében kiszámítandó a szél nagysága és iránya minden pontban, ha ismerjük a vizsgált területen a beépítettségi magasságokat és a szél nagyságát és irányát a tartomány szélén. Nálunk a vizsgált terület Győr városában a Balcsy-Zsilinszky út – Baross út – Szigeti Attila út – Fehérvári út által közrefogott négyszögletes alapú, 200 méter magasságú, 3 dimenziós tartomány, amelyből természetesen hiányoznak az épületek által elfoglalt térrészek (szemléltetéshez lásd az alábbi ábrákat). Ez a feladatunk áramlási tartománya. Azt tételezzük fel, hogy a tartomány Szent István úthoz tartozó szélén északnyugati irányú, 10 m/s nagyságú szél fúj. Azt vizsgáljuk, hogy ennek hatására milyen állandósult szélviszonyok alakulnak ki az áramlási tartomány pontjaiban, csak levegő áramlását figyelembe véve.

A megoldási algoritmus lényege az, hogy kis cellákra osztjuk az áramlási tartományt és minden egyes cellában már lényegében állandónak tekintjük a levegő áramlási adatait, így nyomását, sebességét és az ezekből kiszámítható további mennyiségeket, pl. a hőmérsékletet. Szoftver segítségével azt vizsgáljuk, hogy az egyes cellabeli értékek miként határozzák meg a szomszédai áramlási jellemző értékeit. Világos, hogy minél kisebb cellákat veszünk figyelembe, annál pontosabb lesz a közelítésünk.

3. fejezet. Geometriai előkészítés

A geometriát a 3D-s AutoCAD szoftver segítségével, Gyulai István vezetésével állították elő. Ezt a CAD-felületek által határolt tartományt kellett kis tetraéderekre, téglalapokra, prizmákra felbontani, azaz az úgynevezett áramlási hálót elkészíteni. Mielőtt meg tudtuk volna ezt tenni, a geometriát ki kellett tisztázni: többszörös éleket kitörölni, átmetsző felületeket kijavítani, stb. Ez azért volt szükséges, hogy a hálózó program, mely lehet pl. az Altair cég HyperMesh nevű szoftvere, működni tudjon; ez létrehozta az áramlási tartomány határfelületét (utakat, házak felületét, stb.) felbontó háromszöghálót. Ezt a felületi hálót a felhasználva a Tgrid szoftver hozta létre a térfogati hálót. Így jött létre az 1. ábrán szemléltetett áramlási tartomány behálózott része.



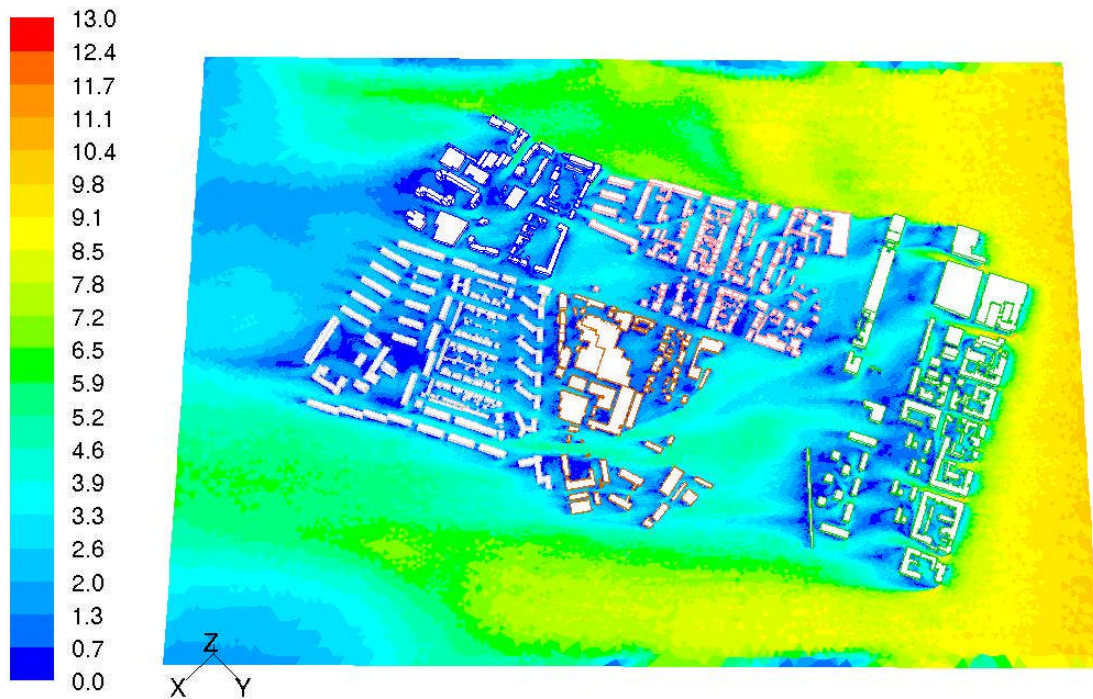
1. ábra: Az áramlási tartomány behálózása.

A háló jellemzésére elmondjuk, hogy 1.500.000, azaz másfél millió cellát, zömében tetraédert tartalmaz. Az egész szimulációnak ez a munkafázis volt a leginkább idő- és munkaigényesebb része, mintegy 30 munkanapig tartott. Mindenesetre, további számítások esetén ezt nem kell még egyszer elvégezni. Megjegyezzük, hogy elkészítettük egy nagyobb kiterjedési rész felületi hálóját is. Becslésünk szerint ez 10 millió cellát fog eredményezni a térfogati háló elkészítésekor.

4. fejezet. A számítógépes szimulációs számítás

Az előző pontban bemutatott hálózási eljárás segítségével megkaptuk az áramlási tartománynak a számításokhoz szükséges geometriai jellemzését, a kis cellákra való felbontást. Ezután a szimulációkhoz meghatároztuk, hogy levegő áramlását fogjuk számítani, turbulencia figyelembe vételével. Az áramlási tartomány peremein szabad kiáramlást, azaz normál légköri nyomást írtunk elő, kivéve az északnyugati lapot, ahol befelé irányuló, 10 m/s nagyságú légmozgást írtunk elő.

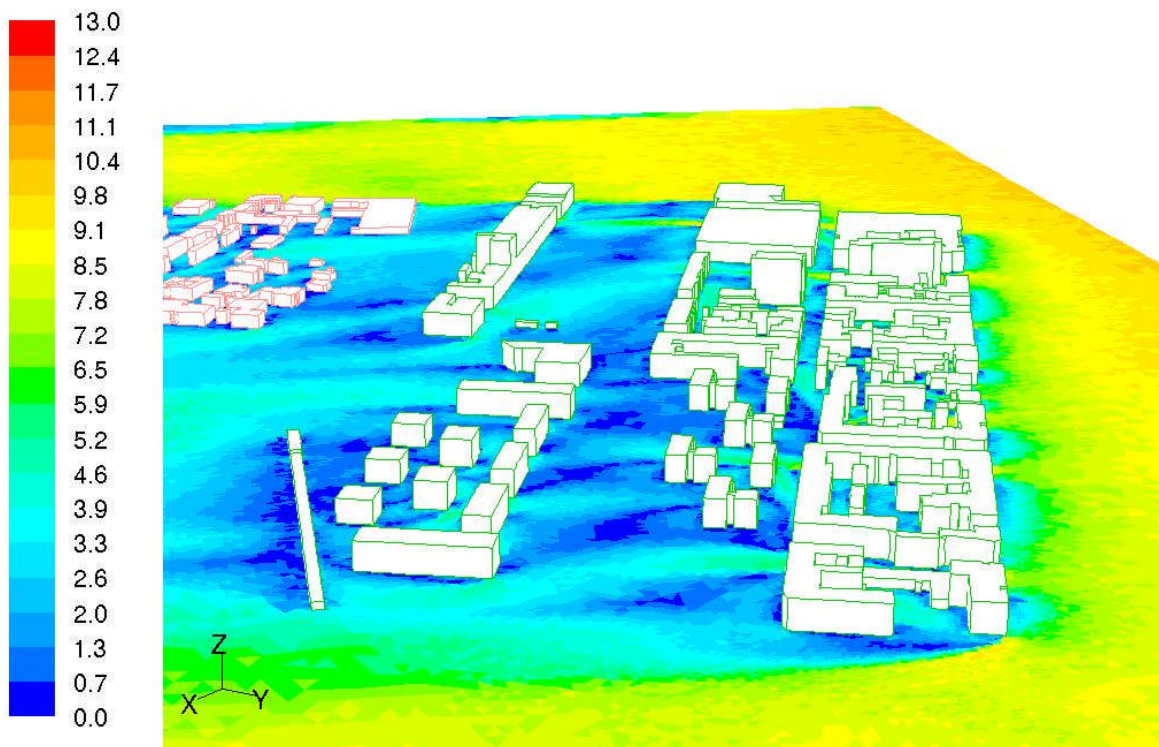
A számítás lefolytatására a Fluent szoftvert használtuk, mely az áramlástan megoldók piacvezető szoftvere a világon. Az eredményekből a szél sebességének nagyságait mutatjuk be a következő két ábrán.



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Feb 08, 2007
FLUENT 6.2 (3d, segregated, ske)

2. ábra. A szél sebességének nagysága a föld felszínéhez közel, felülnézetből.



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Feb 08, 2007
FLUENT 6.2 (3d, segregated, ske)

3. ábra. A Szent István út vizsgált szakaszán a szél nagysága.

5. fejezet. Az eredmények értékelése

A fent bemutatott módszerrel megkaptuk Győr vizsgált területének pontjaiban a szél nagyságát. Az eredményekből látható, hogy kialakulnak úgynevezett pangó részek, ott, ahol a szél sebessége nagyon alacsony (ez az ábrán a kézzel megjelölt részeket jelenti). Ezeken a helyeken kibocsátott szennyezés különösen veszélyes, mert ott marad. Ilyen részre megemlíjtük a Tihanyi Árpád útra torkolló kis utcákat.

Ez az elemzés tetszőleges uralkodó szélirány mellett elvégezhető, most már viszonylag könnyen, hiszen a nagyon idő- és emberigényes munkát, a geometria tisztítását és hálózását nem kell többet elvégezni, csak az áramlástanai számítások futtatását, ami inkább csak a számítógéptől kíván erőfeszítést.

Habár pusztán a szélsősebességek számszerű értékéből is sokat ki lehet következtetni a szennyeződés eloszlására, teljes körű választ a problémára egy többkomponensű számítás adna.

6. fejezet. A projekt lehetséges folytatásának vázlata

Tanulmányunkban leírtuk, hogyan oldottuk meg Győr egy vizsgált területének légáramlási szimulációját. Ebbe a modellbe beilleszthető forrástagként az, ha máshonnan tudjuk az egyes útszakaszok szennyező anyagának kibocsátását, például közvetlen forgalomszámlálási adatokból, vagy más modellező program segítségével kapott értékekből. Ehhez a következőt kellene az általunk bemutatott modellen változtatni:

- bejelölni a felületi háló azon háromszögeit, amelyek a modellben szennyeződést kibocsátó felületként fognak szerepelni a modellünkben;
- a bejelölt háromszögekhez meghatározni az ott kibocsátott szennyezőanyag mennyiségét;
- a szennyező anyag termodinamikai paramétereit irodalomkutatással meghatározni;
- az áramlástanai megoldóban két komponensű áramlás számítását beállítani, forrástagként figyelembe véve a bejelölt felületeket a rendelkezésre álló szennyezőanyag-kibocsátási modell alapján.

Ezután a Fluent szoftverrel megkaphatjuk a kibocsátott szennyezőanyag térbeli elterjedésének leírását. Megjegyezzük, hogy hasonló feladatra Magyarországon a BME Áramlástan Tanszékén folytak sikeres kutatások Budapest egy meghatározott területének (az új Nemzeti Színház környezetének) modellezésére.

Szennyező-anyag transzportjának szimulációja CNN módszerrel

Keresztes Péter

1. A folytonossági egyenlet

A folytonossági egyenlet segítségével leírható legtöbb fizikai transzport folyamat, közöttük a környezet-szennyezés alapvető mechanizmusai is. Ezek a diffúzió, amely általában anizotrop, valamint a szél hatására létrejövő sodródás (drift) is. A folytonossági egyenlet ugyanakkor lehetővé teszi, hogy a szennyező-anyag generációját, illetve a lebomlás következtében beálló rekombinációját is figyelembe vegyük.

$$\dot{c} = g - r + h \operatorname{div} D + k \operatorname{div} \operatorname{grad} c$$

c a szennyező anyag koncentrációja,

g a generációs ráta,

r a rekombinációs ráta,

D a drift vektor,

h, k pedig állandók.

2. A folytonossági egyenlet EULER-integráljának CNN alakja

$$c_{ij}(t + \Delta t) = c_{ij}(t) + \Delta t (g_{ij} - r_{ij} + \sum_{w_{ij}} T_{kl}^{DIFF} c_{kl}(t) + \sum_{w_{ij}} T_{kl}^{DRIFT} c_{kl}(t))$$

$$k \operatorname{div} \operatorname{grad} c \rightarrow T_{ij}^{DIFF}$$

$$h \operatorname{div} D \rightarrow T_{ij}^{DRIFT}$$

Itt a hozzárendelt *template* (T) mátrixok 3×3 méretűek, és leírják a fizikai folyamatok mennyiségi viszonyait. A sodródás template-matrixa itt egy észak-nyugat felől délkelet felé irányuló szelet, míg a diffúzió template matrixa mos izotrop diffúziót ír le.

A generációs illetve rekombinációs ráta, illetve a template-matrixok akár pontonként is megadhatók.

$$T_{ij}^{DRIFT} = \begin{pmatrix} h & 0 & 0 \\ 0 & -h & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad T_{ij}^{DIFF} = \begin{pmatrix} k & k & k \\ k & -8k & k \\ k & k & k \end{pmatrix}$$

3. A VHDL modell alap-csomagja

Az 1. Függelék¹ azt a VHDL csomagot mutatja be, amely a kísérletképpen végrehajtott számításokat alapozza meg. A koncentrációt végül is relatív, százalék-értékekkel kifejezett értékekben mérjük, 0-tól 100 százalékig. A végső transzformációt a **CONV** függvény állítja be. A koncentráció-mátrix három-dimenziós, $64 \times 64 \times 4$ méretű, és konstansok átírásával (*imax*, *jmax*, *kmax*) változtatható. Valamennyi tömbbeli ponthoz hozzárendelhető egy generációs és egy rekombinációs érték, valamint egy, a diffúziót és másuk, a sodródást leíró szuper-mátrix. A szuper-mátrix olyan $64 \times 64 \times 4$ méretű mátrix, amelynek elemei $3 \times 3 \times 3$ méretű kismátrixok. A csomagban néhány alapvető kismátrixot (*kistomb*) mátrixot (*tomb*) illetve szuper-mátrixot (*szupertomb*) definiáltunk, ezek azonban rugalmasan változtathatók, illetve a kollekció bővíthető.

A kiértékelés az **E** függvény segítségével történik, amely egy adott pontban kiszámítja az egységnyi sugarú környezet koncentrációinak és a megfelelő template-értékek szorzatainak az összegét. Az **E** függvény használja a **W** függvényt, amely egy tömb egy pontjának és az azt körülvevő pontoknak a koncentráció adatait foglalja egy kis méretű tömbbe.

4. A VHDL modell

A VHDL modell a következő eljárásokból építhető fel:

C_A :

Három-dimenziós tömb, amely az **A** szennyező-anyag adott időpontbeli térbeli eloszlását írja le, relatív koncentráció-értékekkel.

next_C_A :

Három-dimenziós tömb, amely az **A** szennyező-anyag következő időpontbeli térbeli eloszlását írja le, relatív koncentráció-értékekkel.

GR_A :

Három-dimenziós tömb, amely az **A** szennyező-anyag generációs rátájának eloszlását írja le, relatív értékekkel.

RR_A :

Három-dimenziós tömb, amely az **A** szennyező-anyag rekombinációs rátájának eloszlását írja le, relatív értékekkel.

TDIFF_A :

Három-dimenziós kistömb, amely az **A** szennyező-anyag diffúziójának template-matrixát írja le eloszlását írja le, relatív értékekkel. A diffúziót leíró kistömb modellezhet általános anizotróp diffúziós mechanizmust is.

TDRIFT_A :

Három-dimenziós kistömb, amely az **A** szennyező-anyag sodródásának template-matrixát írja le eloszlását írja le, relatív értékekkel.

TTDIFF_A :

Három dimenziós szuper-tömb, amely a diffúziós template-k térbeli eloszlását írja le. Azaz minden pontban más diffúziós template megadására van lehetőség.

¹ A függelékeket a terjedelmi korlátozás miatt nem mellékeljük.

TTDRIFT_A :

Három dimenziós szuper-tömb, amely a sodródási template-k térbeli eloszlását írja le. Azaz minden pontban más sodródási template megadására van lehetőség.

A VHDL processzus a következő szekvenciával építi fel a szimulációs modellt:

A **START** jel felfutása után a

DEF_TOMB0(C_A) és a

DEF_TOMB0(next_C_A)

eljárások segítségével az **A** anyag koncentrációját leíró tömb elemei az egész térre kinullázódnak. Ezután a

DEF_SZUKTOMB0(GR_A) és a

DEF_SZUKTOMB0(RR_A)

eljárások az egész térre zérus generációt és zérus rekombinációt állítanak be, majd a

DEF_KISTOMB0(TDIFF_A),
DEF_KISTOMB0(TDRIFT_A),
DEF_SZUPTOMB_HOM(TDIFF_A, TTDIFF_A),
DEF_SZUPTOMB_HOM(TDRIFT_A, TTDRIFT_A)

eljárásokkal beállítunk egy homogén zérus kezdeti diffúziót és sodródást az egész térre.

Ezután az **INIT** jel felemelésére várakozunk.

wait until INIT = '1';

DEF_LINE_X(10, GR_A);

DEF_KISTOMB_DIFF_IZOT(TDIFF_A);
DEF_KISTOMB_DRIFT_NW(TDRIFT_A);

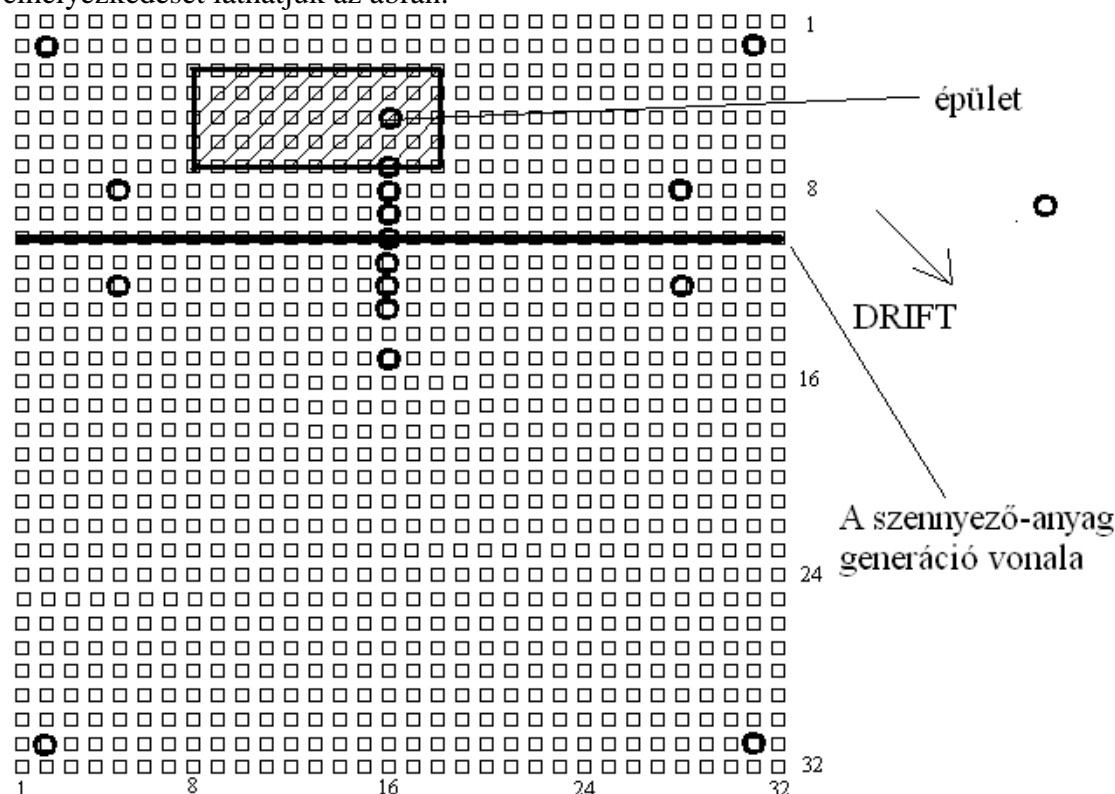
DEF_SZUPTOMB_HOM(TDIFF_A, TTDIFF_A);
DEF_SZUPTOMB_HOM(TDRIFT_A, TTDRIFT_A);

DEF_HAZ(8,3,10,4, TTDIFF_A);
DEF_HAZ_DRIFT(8,3,10,4,TTDRIFT_A);

sC_A <= C_A;
snext_C_A <= next_C_A;
sGR_A <= GR_A;
sRR_A <= RR_A;
sTDIFF_A <= TDIFF_A;
sTDRIFT_A <= TDRIFT_A;
sTTDIFF_A <= TTDIFF_A;
sTTDRIFT_A <= TTDRIFT_A;

5. A példaképpen lefuttatott szimulációs modell

Az áttekinthető ábrázolás érdekében a tömbnek egy 32×32 méretű síkját ábrázoljuk, egy autóúttal és egyetlen háztömbbel, amelynek magassága a harmadik rétegig ér. A mérőérzékelők elhelyezkedését láthatjuk az ábrán.



6. Szimulációs eredmények

A futási eredményeket az elhelyezett érzékelőkön mért relatív koncentráció adatok időfüggésének listájával mutatjuk be. 12 időlépés után az adatok tovább nem változtak, azaz a szennyező-anyag adott emissziós sebességénél, valamint a modellben felvett diffúziós és sodródási ráták mellett a rendszer kvázi-stacionárius állapotba került. Ez azt jelenti, hogy a koncentráció-növekedés annyira lelassult, hogy a folyamat további szimulációja felesleges.

16	16	16	16	16	16	16	16	2	30	30	5	5	28	28
5	7	8	9	10	11	12	13	2	2	30	8	12	8	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<hr/>														
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2	9	80	12	3	0	0	0	0	2	3	2	3
0	2	4	14	89	19	7	2	0	0	0	4	6	4	7
0	3	5	16	92	22	9	4	0	0	0	5	9	5	9
0	3	6	18	94	23	10	5	0	0	0	6	10	6	10
0	4	7	18	94	24	11	5	0	0	0	6	11	6	11
0	5	7	19	95	25	11	6	0	0	0	6	11	7	11
0	5	8	19	95	25	12	6	0	0	0	7	11	7	12
0	5	8	19	96	25	12	6	0	0	0	7	11	7	12
0	5	8	20	96	25	12	7	0	0	0	7	11	7	12
0	6	8	20	96	26	12	7	0	0	0	7	11	7	12
0	6	9	20	96	26	12	7	0	0	0	7	12	7	12
0	6	9	20	96	26	13	7	0	0	0	7	12	7	12

6. Konklúziók és továbbfejlesztési lehetőségek, igények

1. A CNN módszer hatékonynak látszik 3 dimenziós transzport modellezésre.
2. A módszer előnye, hogy a diffúziós és sodródási jellemzők akár térbeli pontonként, akár időfüggő értékeként is beállíthatók, azaz a modell a rendelkezésre álló eszközökkel ilyen tulajdonságokkal is felépíthető.
3. Meg kell oldani a normálást, azaz a jelenlegi relatív mennyiségi adatokhoz valóságos fizikai értékeket kell rendelni.
4. Be kell illeszteni a rendszert egy legalább rétegenként 2D képeket generáló rendszerbe, hogy a szennyező-transzport szemléletes és könnyen követhető legyen.

Úthálózatok Gépjárműforgalmát és az Okozott Környezeti Terhelést Modellező Szimulációs Szoftvercsomag

Csík Árpád György

1. Bevezetés

Napjainkban egy átlagos modern nagyvárost érő környezeti terhelés domináns komponense a helyi és az áthaladó gépjárműforgalomból ered. A gépjárművek szilárd részecskék, mérgező gázok, és intenzív zaj kibocsátásával szennyezik a városokban élő és dolgozó emberek környezetét. Ezért környezetvédelmi szempontból alapvető fontossággal bírnak az olyan eszközök, melyek használatával egyrészt csökkenthető a már meglévő városrészek szennyezettségi szintje, másrészt lehetőség nyílik az urbanizáció terjedésének *előzetes* tervezésén és optimalizáláson alapuló *tudatos* szabályozására.

A projekt újdonságtartalma egy fejlett numerikus szimulációs technológiákra épülő informatikai rendszer prototípusának megalkotása, mely tetszőleges úthálózatok gépjárműforgalmának, és a társult környezeti terhelés eloszlásának számítógépes modellezésére használható. A rendszer alkalmazásával komplex úthálózatok kiépítése, módosítása, bővítése, valamint a változások forgalomra, légszennyezettségre, zajterhelésre gyakorolt hatása válik előre tervezhetővé, illetve megismerhetővé. Az elkészült szimulációs szoftver elősegíti városok, városrészek forgalmának optimalizálását, úthálózatok áteresztőképességének növelését, valamint a környezeti terhelés csökkentését – mely feladatok a napjainkban elterjedt *ad hoc* jellegű módszerek alkalmazásával, illetve pusztán mérnöki intuícióna támaszkodva nem, vagy csak sokkal kevésbé hatékonyan végezhetőek el.

2. A numerikus szimulációs szoftver

A közúti forgalom állapotának számítógépes szimulációjára három hatékony megközelítés, a *makro-*, a *mezo-*, illetve a *mikro-szintű* modellezés használatos. A projekt futamideje alatt kifejlesztett szoftverbe ezen lehetőségek közül az első és az utolsó került beépítésre.

A közlekedési modellek makroszkopikus, folytonos eloszlásfüggvényen alapuló osztálya annak a ténynek a megfogalmazására épül, hogy egy zárt úthálózaton a gépjárművek által elfoglalt útszakasz hossza csak akkor változhat, ha a kérdéses hálózatba járművek lépnek be vagy áramlanak onnan ki a külvilágtól elválasztó határpontokon keresztül. Ez a logika a tudomány és a technika számos ágának képezi alapvető tézisé, melyet rendszerint *megmaradási törvénynek* nevezünk. A megmaradási törvények vonzó tulajdonsága hogy konkrét alkalmazástól függetlenül igen kompakt alakban fogalmazhatóak meg, a formalizmus matematikai tulajdonságai részletesen ismertek, valamint a szakirodalom megoldásukra kidolgozott módszerek széles választékát tartalmazza.

Bizonyos forgalmi helyzetek vizsgálata szükségessé teszi a járművek egyedi mozgásának követését. Ilyen esetekben a közúti járműforgalom részecske alapú modellje nyújtja a rendszer megfelelő matematikai leírását. A részecske alapú mikroszkopikus modellben az egyes járművek térbeli kiterjedéssel rendelkező merev testként kezelendők. A modell jellegéből fakadólag egy jármű mozgásállapotának változása a klasszikus mechanika elméletén alapszik. Ennek megfelelően, egy jármű állapotát az útszakasz kezdőpontjához viszonyított *koordinátája* valamint *sebessége* jellemzi. A jármű mozgásállapotának változását megadó pillanatnyi *gyorsulás* a jármű technikai paraméterein kívül értelemszerűen függvénye a környező forgalom állapotának és a követendő forgalmi szabályoknak. A gépjárműforgalom részecske alapú szimulációja a mozgásegyenletek egzakt integrálásán alapszik azzal a

feltevessel, hogy egy nagyon rövid időtartam erejéig a követendő jármű pillanatnyi gyorsulása alacsony fokszámú polinommal közelíthető. A részecske alapú szimulációs modul egyik legfontosabb komponense a mesterséges intelligenciát definiáló szubrutin, mely megadja hogy a pillanatnyi közlekedési helyzetben a járművezető milyen mértékben nyomja le a gáz- illetve fékpedált. A jármű technikai adottságait figyelembe véve a pedálok helyzetéből a numerikus modul kiszámítja a pillanatnyi gyorsulást, majd meghatározza az új mozgásállapotot.

A mikroszkopikus modellben a szimuláció során az egyes járművek identitásukat megőrzik, mozgásukat egyenként követjük nyomon. A modell előnye hogy igen nagy pontosságú becslést nyújt a forgalom állapotának időbeni fejlődésére vonatkozólag, hátránya a makroszkopikus módszerrel szemben relatív nagy számítási igénye. Ezzel szemben, a makroszkopikus modell nem különbözteti meg az egyes járművek identitását, hanem a fentieknek megfelelően egy folytonos gépjármű-sűrűség függvénnyel írja le a forgalom állapotát. Előnye hogy képes hosszú útszakaszok forgalmát relatív kevés számítási kapacitást igényelve nagy pontossággal megadni, de az egyes járművek identitása teljesen elmosódik.

A két modell közti kompromisszumnak tekinthető a *mezo-szintű* modell, mely több járműből álló csoport együttes mozgását követi nyomon a mikroszkopikus megközelítés szabályai szerint. Előnye a mikro-szintű modellezéssel szemben, hogy kevesebb számítási kapacitást igényel, hátránya hogy több járművet csoportba foglalva azok mozgása a teljes szimulációs időtartam során irreálisztikusan egymáshoz kötődik. Felépítéséből fakadólag a mikro-szintű modell a városi, a mezo-szintű modell a városi és az országúti, míg a makro-szintű modell az országúti forgalom szimulációjára használható hatékonyan.

A szimulációs szoftver által meghatározott forgalmi helyzet pontos ismerete kiváló lehetőséget biztosít az egyes járművek által gerjesztett környezeti terhelés komponenseinek (részecske, gáz, zaj) modellezésére és az integrált szennyezés mértékének kiszámítására. A gépjárművek táblázatba foglalt technikai adatainak alapján, a motor fordulatszámának és terhelésének megfelelően adható meg a keletkezett szennyezőanyagok mennyisége, valamint a zajterhelés.

A környezetszennyezési modullal párhuzamosan fejleszthető a szociológiai modul, mely lokálisan gyűjtött statisztikai adatbázisra támaszkodva határozza meg a sofőrök adott forgalmi helyzetben tanúsított viselkedését – azaz a jármű vezetője milyen mértékben nyomja le a fék vagy a gázpedált, előzésbe vagy esetleg irányváltásba kezd.

2.1 A makroszkopikus modell

A közlekedési modellek folytonos eloszlásfüggvényen alapuló osztálya annak a ténynek a megfogalmazására épül, hogy egy zárt úthálózaton a gépjárművek által elfoglalt útszakasz hossza csak akkor változhat, ha a kérdéses hálózatba járművek lépnek be vagy áramlanak onnan ki a külvilágtól elválasztó határpontokon keresztül. Ez a logika a tudomány és a technika számos ágának képezi alapvető tézisé, melyet rendszerint *megmaradási törvénynek* nevezünk. A megmaradási törvények vonzó tulajdonsága hogy konkrét alkalmazástól függetlenül igen kompakt alakban fogalmazhatóak meg, a formalizmus matematikai tulajdonságai részletesen ismertek, valamint a szakirodalom megoldásukra kidolgozott módszerek széles választékát tartalmazza.

A közúti közlekedés modellezésében alapvető szerepet játszik a $\rho(x,t)$ *gépjármű-sűrűségfüggvény*, röviden *sűrűségfüggvény*, mely absztrakt módon megadja a járművek által elfoglalt útszakasz relatív hosszúságát. Definícióból fakadólag, egy adott t_0 időpontban a sűrűségfüggvény teljes úthálózatra vett integrálja megegyezik a kérdéses úthálózaton tartózkodó járművek hosszának az összegével:

$$(1) \quad \int_M \rho(x,t) dx = \sum_{i=1}^N l_i,$$

ahol az angol *map* (térkép) szót követve \mathcal{M} jelöli a kérdéses úthálózatot (*térképet*), N a térképen tartózkodó járművek számát és l_i az i . jármű hosszát. Értelemszerűen, a modell térbeli léptéke lényegesen hosszabb mint a közlekedésben részt vevő leghosszabb gépjármű. A tapasztalatnak megfelelően a gépjárművek haladási sebessége függ a sűrűségfüggvény lokális értékétől (minél kevesebb jármű halad az úton, annál jobban megközelítik a maximálisan megengedett sebességhatárt). A modell bemenő paramétere a teljes útszakaszon definiált sűrűségfüggvény a kezdeti időpontban, valamint a rendszerbe áramló határpontoknál mért fluxus az idő függvényében. Kimeneti adat a teljes úthálózatra vonatkozó diszkrét sűrűségfüggvény a megfigyelt időtartományban.

A közúti forgalom folyadék alapú modelljében a közlekedés állapotát reprezentáló gépjármű-sűrűségfüggvény időbeni változása 1-dimenziós, forrástaggal kiegészített megmaradási törvényt elégít ki:

$$(2) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S,$$

ahol ρ az ún. *megmaradó mennyiség*, F az egész úthálózaton, valamint annak minden határán értelmezett *fluxusfüggvény*, és S az út mentén leparkoló, illetve a parkolásból a forgalomba induló járművek hatását tekintetbe vevő forrástag. A közlekedési modellek további közös tulajdonsága hogy a járművek $v(\rho(x,t), x, t)$ sebességgel történő áramlását modellező fluxus a következő alakban írható fel:

$$(3) \quad F = v(\rho(x,t), x, t) \rho(x,t).$$

Amennyiben a haladási sebesség független a sűrűségfüggvénytől *lineáris* modelltől beszélünk, máskülönben a modell *nem-lineáris*. Mivel a (2) típusú parciális differenciálegyenlet numerikus megoldásának szakirodalma mintegy fél évszázados múltra tekint vissza, a szoftver tervezésekor kiemelt hangsúlyt kapott azon technológiák kiválasztása melyek a forgalom szimulációja által támasztott speciális igényeknek messzemenőkéig megfelelnek.

2.2 A mikroszkopikus modell

Bizonyos forgalmi helyzetek vizsgálata szükségessé teszi a járművek egyedi mozgásának követését. Ilyen esetekben a közúti járműforgalom részecske alapú modellje nyújtja a rendszer megfelelő matematikai leírását. A részecske alapú modellben az egyes járművek térbeli kiterjedéssel rendelkező merev testként kezelendők. A modell jellegéből fakadólag egy jármű mozgásállapotának változása a klasszikus mechanika elméletén alapszik. Ennek megfelelően az i . jármű állapotát az útszakasz kezdőpontjához viszonyított *koordinátája* (x_i) valamint *sebessége* (v_i) jellemzi. A jármű mozgásállapotának változását megadó pillanatnyi *gyorsulás* (a_i) a jármű technikai paraméterein kívül értelemszerűen függvénye a környező forgalom állapotának és a követendő forgalmi szabályoknak.

A gépjárműforgalom részecske alapú szimulációja a mozgásegyenletek egzakt integrálásán alapszik azzal a feltevéssel, hogy egy nagyon rövid Δt időtartam erejéig a követendő jármű

gyorsulása állandó. Ha az i . jármű állapota (x_i^n, v_i^n) ismert az n . szimulációs lépésben, Δt idő elteltével az $n+1$. lépésben helyzetét és sebességét a következő egyenletek adják meg:

$$(4) \quad x_i^{n+1} = x_i^n + \frac{v_i^n + v_i^{n+1}}{2} \Delta t,$$

$$(5) \quad v_i^{n+1} = v_i^n + a_i^n \Delta t.$$

A részecske alapú szimulációs modul egy fontos komponense a mesterséges intelligenciát definiáló szubrutin, mely megadja hogy a pillanatnyi közlekedési helyzetben a járművezető milyen mértékben nyomja le a gáz- illetve fékpedált. A jármű technikai adottságait figyelembe véve a pedálok helyzetéből a szoftver kiszámítja a pillanatnyi gyorsulást, majd a (4) és a (5) egyenletek szerint meghatározza az új mozgásállapotot.

3. A szoftver felépítése és működése

A fejlesztés jelenlegi fázisában a szimulációs szoftver egy objektum orientált, C++ nyelven fejlesztett könyvtár formájában használható fel, követve a C++ szintaxisát. A megfelelő fejléc (*forras.h* file) csatolását követően a szoftver teljes funkcionalitása a felhasználó rendelkezésre áll az úgynevezett **map** osztályhoz tartozó publikus függvények hívásával. A szoftver adatstruktúrájának a felhasználó szempontjából lényeges alkotóelemei a **map** (térkép), **road** (út) és a **boundaryPanel** (határpont) osztályok.

A **boundaryPanel** osztály *határpontokat* definiál, melyek összekötik a szimulált úthálózatot a külvilággal. A felhasználónak lehetősége van a bemenő forgalom mértékét az idő függvényében változtatni. Ehhez csupán egy megfelelő formai követelményeknek eléget tevő szubrutin csatolandó a szoftver forráskódjához.

A **road** osztály két, egymással ellentétes irányítású forgalmi sávból felépülő, leágazásoktól és bekötőutaktól mentes *útszakaszt* definiál. Minden útszakaszt egy *bal*, valamint egy *jobb* oldali ún. *csatolópont* zár le. A definícióból fakadólag mindkét csatolópont tartalmaz legalább egy bemenő, illetve egy kimenő forgalomhoz illeszkedő csatlakozási pontot.

A **map** osztály egy *térképet* határoz meg, mely több **road** valamint **boundaryPanel** osztályhoz tartozó objektum funkcionális hálózatba kapcsolásából és a rendszer működtetését végző függvényekből áll. A felhasználó csak **map** típusú objektumokat hoz létre, és ezeken keresztül kommunikál a szoftver moduljaival.

A 3.1 pontban egy konkrét példa megoldásán keresztül mutatjuk be a rendszer használatának lépéseit a makroszkópikus modellt választva. Az egyes lépések számozva vannak, melyek magyarázata a tesztprogram után található. A teszt egy Y elágazás kétirányú forgalmának másfél órás időtartamot átfogó szimulációja, melynek végeredménye az 1. ábrán látható.

3.1 Tesztprogram

```
1    #include "forras.h"

    void simulation()
    {
2        map Ysection ;

3        Ysection.addRoad( 100, "Ysection/roadDataA.txt" ) ;
```

```

3      Ysection.addRoad( 100, "Ysection/roadDataB.txt" );
3      Ysection.addRoad( 100, "Ysection/roadDataC.txt" );

4      Ysection.addBoundaryPanel( BcA );
4      Ysection.addBoundaryPanel( BcB );
4      Ysection.addBoundaryPanel( BcC );

5      Ysection.createLink( -1, 1 );
5      Ysection.createLink( 1, 3 );
5      Ysection.createLink( -2, 2 );
5      Ysection.createLink( 2, 3 );
5      Ysection.createLink( 3, -3 );

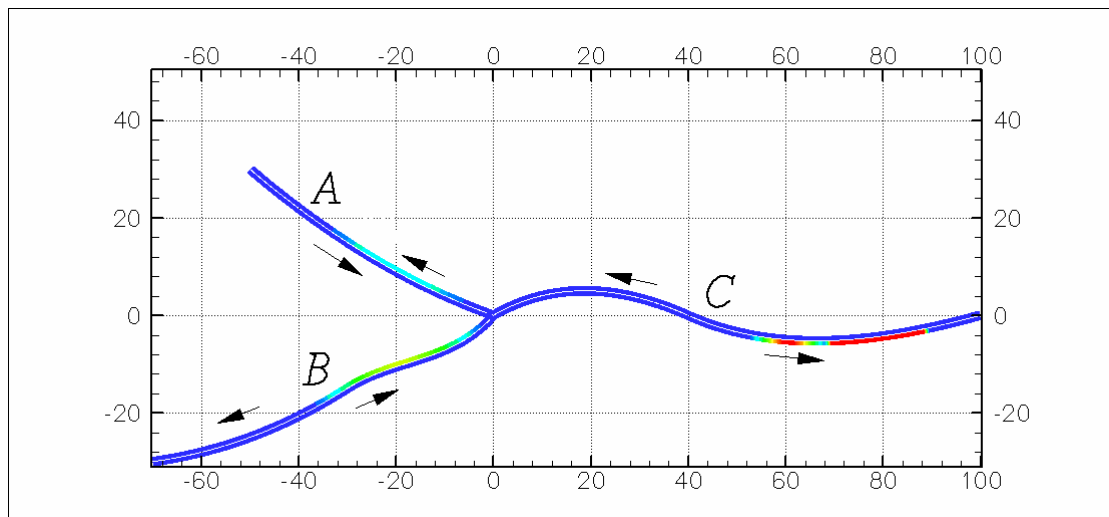
6      Ysection._setRate( 1, 3, rate0_3 );
6      Ysection._setRate( 2, 3, rate0_7 );

7      Ysection.updateMap(1.5, "Ysection" );
    }

```

A szoftver használatának lépései

1. A könyvtár csatolása.
2. Egy Ysection nevű map objektum (térkép) létrehozása.
3. A 2. pontban létrehozott térképhez tartozó útszakaszok csatolása.
4. A 2. pontban létrehozott térképhez tartozó határpontok csatolása.
5. Az útszakaszok és határpontok hálózatba kapcsolása.
6. Az Y-ágban kettéágazó forgalom eloszlását definiáló függvény megadása.
7. A térképen zajló forgalom szimulációja.



1. ábra: Y-elágazás kétirányú, másfél órán át zajló forgalmának numerikus szimulációját követő állapot. A betűk a példaként közölt forráskódban létrehozott útszakaszok jelzését követik, míg a nyilak az egyes sávok forgalmának irányítását jelzik. Sötétkék: nincs forgalom. Piros: nagy forgalomsűrűség.

3.2 A szoftver jelenlegi felépítése, tervezett fejlesztések

Az alábbiakban pontokba szedve tömören összefoglaljuk a projekt futamideje alatt kifejlesztett szoftver tulajdonságait, valamint a hatékonyabb működés érdekében tervezett jövőbeni fejlesztéseket. Megjegyezzük, hogy a szoftver szerkezete, alapvető funkciói már elkészültek, és sikeresen megfeleltek egy szigorú szabályok szerint felépített teszt sorozat követelményeinek. A további funkciók megvalósítása csupán kisebb modulok, szubrutinok fejlesztését és integrálását igényli.

3.2.1 A szoftver jelenlegi felépítése

Úthálózat geometria:

1. Két, egymással ellentétes irányítású forgalmi sávból álló útszakaszok kezelése.
2. Útszakaszonként megadható maximális haladási sebesség.
3. Sebességhatároló táblák elhelyezése.
4. Tetszőleges geometriájú útszakaszok kezelése.
5. Tetszőleges számú út találkozásából álló kereszteződés modellezése.
6. Felhasználó által megadható, időtől függő bemenő feltételek a határpontokon.
7. Felhasználó által megadható, időtől függő forgalommegoszlás sávsvétváltás esetén.

Makroszkopikus forgalomszimulációs modell:

1. Beépített nemlineáris fluxusfüggvény.
2. Felhasználó által csatolható fluxusfüggvény komplex forgalmi modell kezelésére.
3. Megmaradási törvény forrásmentes – parkolási lehetőség nincs beépítve.
4. Megmaradási törvény explicit numerikus integrálása.
5. Egy processzoron futó alkalmazás.

Mikroszkopikus forgalomszimulációs modell:

1. Vezetői intelligencia a követett és a követő jármű sebességén és helyzetén alapszik.
2. Szabadon fejleszthető vezetői intelligencia.
3. Parkolás, jelzőlámpák, jobb kékszabály nincs beépítve.
4. Mozgásegyenletek egzakt integrálása.
5. Egy processzoron futó alkalmazás.

Környezetszennyezési modell:

Egyszerű kvótarendszer - a járművek mozgás közben időegységenként adott mennyiségű szennyeződést bocsátanak ki, függetlenül annak típusától.

3.2.2 Tervezett fejlesztések

Úthálózat geometria:

1. Tetszőleges számú forgalmi sávot tartalmazó útszakasz kezelése.
2. A forgalom állapotát befolyásoló (pl. elsőbbségadási) táblák elhelyezése.

Makroszkopikus forgalomszimulációs modell:

1. Többkomponensű modell kifejlesztése.
2. Több processzoron egyidejűleg, összehangoltan futó alkalmazás.

Mikroszkopikus forgalomszimulációs modell:

1. Jelzőlámpák, jobb kékszabály modellezése.

2. Parkolás, előzés modellezése.
3. Vezetői intelligencia fejlesztése.
4. Több processzoron egyidejűleg, összehangoltan futó alkalmazás.

Környezetszennyezési modell:

Részletes, a motor típusától, korától, terhelésétől függő, táblázat alapú környezetszennyezési modell fejlesztése a részecske, gáz, zaj komponensekre.

4. Demonstrációs teszt

A teszt során egy Győr belvárosában kijelölt, kb. 1400×700 négyzetméteres városrész gépjárműforgalmának szimulációját végezzük el. A számítógépes modell nagy pontossággal követi az úthálózat valós geometriai felépítését, elhanyagolva néhány kisebb forgalmú utcát, melyek többnyire zsákutcák. A vizsgált területet átszeli egy nagy forgalmú út (Szigethy Attila út), néhány közepes forgalmú út és számos mellékutca.

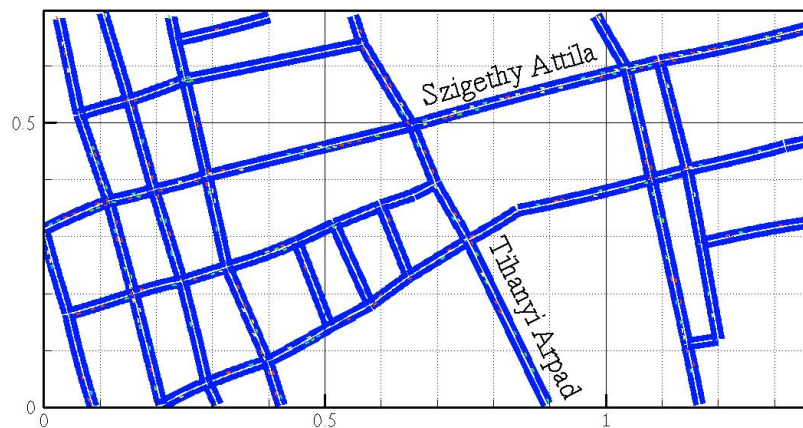
A probléma jellege miatt a mikroszkopikus közlekedési modellt használjuk, nyomon követve minden egyes jármű mozgását és károsanyag-kibocsátását. A kezdeti állapotban a kétsávos útszakaszokból felépült hálózaton nem tartózkodik jármű. A forgalom a külső világtól elválasztó 18 határponton keresztül áramlik a szimulált térbe, határpontonként különböző, az utak forgalmát tükröző sűrűséggel. A kis mellékutcákban kb. 2-3 jármű/perc, míg a nagy forgalmú utakon kb. 20-25 jármű/perc a beáramlási ráta maximuma. Az egyes elágazásokban a forgalom előre rögzített, de kereszteződésenként változó arányban oszlik meg. Az itt használt forgalom beáramlási és megoszlási adatok becsült értékek, valós forgalomszámlálási adatok birtokában pontos időfüggő függvények lennének alkalmazhatóak.

A szimulált valós időtartam 60 perc, a program futási statisztikáit az I. táblázatban közöljük. A szoftver nem gépigényes, a tesztek során alkalmazott, a mai technológiai szintet tekintve korszerűnek nem mondható számítógépes környezetben (PIII 1GHz, 512 MB RAM, Windows 98) a szimuláció kevesebb mint 3 másodpercet vett igénybe. Az adatok ismeretében egy napjainkban összeállított átlagos számítógép-konfiguráción egy 50 négyzetkilométeres belvárosi terület forgalmának teljes részletességű, egy órán át tartó modellezése kevesebb mint egy perc számítógépidőt venne igénybe.

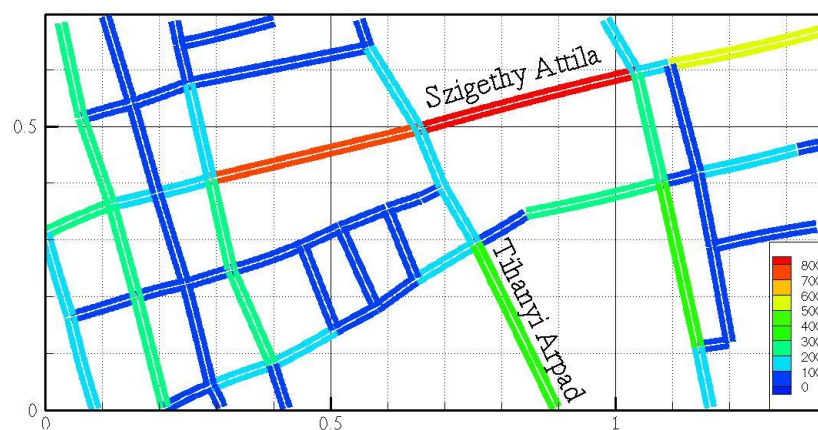
Mivel a hajnali órákban a levegő szennyezőanyag-tartalma gyakorlatilag nulla és ilyenkor számottevő mennyiségű jármű nem tartózkodik az utakon, ezért ez a tesztet a reggeli csúcsforgalom kialakulásának korai fázisát, és az ennek során létrejövő légszennyeződést modellezi. A forgalom állapotának pillanatnyi helyzete a szimuláció végeztével a 2. ábrán látható. A kis színes szimbólumok jelzik a járművek pillanatnyi helyzetét. A 3. ábrán az egy órányi forgalomáramlás alatt az egyes útszakaszokon kibocsátott *összesített* szennyezőanyag mennyiségét ábrázoljuk. A piros szín a magas, míg a kék szín az alacsony szennyezettséget jelöli. Azonos forgalomsűrűség mellett egy rövidebb útszakaszon nyilván magasabb mennyiségű káros anyag termelődik, mint egy hosszabb szakaszon. Ezt ellensúlyozandó, a 4. ábrán a hosszegységre vetített károsanyag-kibocsátás mértékét ábrázoljuk, hasonló színskálával mint az előző esetben. Az ábrán ténylegesen látható hogy az egyes útszakaszok milyen terhelést jelentenek a környezetre nézve. Pirossal rajzolódnak ki a magasan, zölddel a közepesen, késsel az alacsonyan szennyezett útszakaszok. Legszenyezettebbnek a legforgalmasabb Szigethy Attila út bizonyul, mivel a legtöbb jármű erre az útra hajt rá a kisebb utcákból és a beáramlási ráta is itt a legmagasabb. Mindazonáltal egy nagyobb területre kiterjedő, forgalmi dugókat és jelzőlámpákat is modellező esetben már nem egyértelműen az az útszakasz lenne a legszenyezettebb, melyen a legnagyobb számú autó halad át. A tervek szerint ezt a kérdést a szoftver továbbfejlesztett változatával vizsgáljuk meg.

Szimulált valós időtartam:	1 óra
Teljes útvonalhossz:	9.099 km
Számítógépidő:	2.69 másodperc
Útszakaszok száma:	64
Határpontok száma:	18
Diszkrét pontok száma:	3 097
Időlépés hossza:	0.1 másodperc
Időlépések száma:	36 000

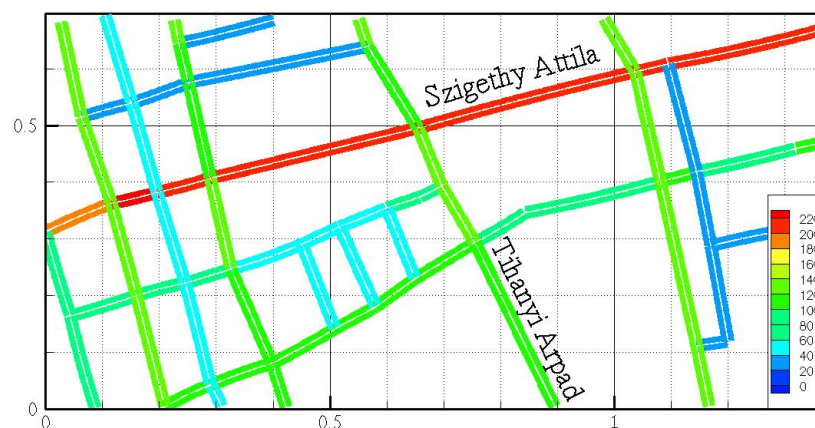
I. táblázat: Szimulációs statisztika.



2. ábra: Győr belvárosának egy 1400×700 négyzetméteres területén a forgalom pillanatnyi állapota egy órányi numerikus szimulációt követően.



3. ábra: Az egyes útszakaszokon kibocsátott szennyeződések teljes mennyisége.



4. ábra: Az egyes útszakaszokon kibocsátott relatív szennyeződés mértéke.

5. Összefoglaló, gyakorlati felhasználási lehetőségek, további tervek

A projekt keretein belül egy gyakorlati igények kiszolgálását célzó informatikai rendszer elemi moduljai kerültek kifejlesztésre és tesztelésre. A rendszer hatékonyan használható közepes méretű városok forgalmának optimalizálására, így a keletkezett légnemű, illetve por formájú szennyeződés mérséklésére. A valós életben történő alkalmazás nagymértékben járulhat hozzá városaink forgalomáteresztő képességének növeléséhez és a környezet terhelésének csökkenéséhez, ami lényegesen javítaná a városban lakó emberek életének minőségét. A projekt futamideje alatt elkészült, gyakorlatban hatékonyan használható eredmények az alábbiak.

1. **Forgalom szimulációs egység:** az úthálózat bemenő pontjainál a forgalom sűrűségének ismeretében a modul **kiszámítja** a vizsgált térrészben **a forgalom időbeni változását és meghatározza a társult környezeti terhelés mértékét.**
2. **Cella automata szimuláció:** egy adott térrészben keletkezett szennyeződés áramlásának, diffúziójának a modellezése. A módszer segítségével **meghatározható,** hogy egy tetszőleges forrásból származó **szennyeződés eloszlása** hogyan változik **az idő függvényében.**
3. Győr belvárosában egy kb. 2 négyzetkilométernyi városrész **3 dimenziós geometriai modelljének** elkészítése. A modell (mely magában foglalja az épületeket, utcákat, tereket) gyakorlati alkalmazásra került a projekt futamideje alatt és kiválóan használható további környezetvédelmi feladatok megoldására.
4. **Aerodinamikai szimulációs teszt:** a 3. pontban kidolgozott modell alapján a FLUENT szimulációs szoftver felhasználásával **meghatároztuk a városrészben kialakuló légmozgások térbeli szerkezetét** domináns észak-keleti széljárást feltételezve. A numerikus eredmények kiértékelése **a talajszinthez közel csekély mértékű légmozgást igazolt,** ami a gépjárműforgalomhoz köthető **szennyeződés lokalizációját, illetve enyhe diffúzióját** vonja maga után. Következésképp, a forgalom szimulációs modul által előre jelzett szennyeződés áramlása nem, csupán diffúziója valószínűsíthető, ezért a modul gyakorlati szempontból jó közelítéssel adja meg a valós értékeket.

Amennyiben a rendszer használatba állítása finanszírozhatóvá válik egy adott városrészben, úgy az alábbi tevékenységek elvégzése válik még szükségessé:

1. **A vizsgált térrész jelenlegi forgalmi helyzetének feltérképezése**, magában foglalva a térrészt átszelő főbb útvonalak belépő pontjainál a forgalomsűrűség mérését az idő függvényében, a éjszakára leparkolt járművek eloszlásának, valamint a forgalom által megcélzott főbb irányoknak a meghatározását.
2. **A forgalom szimulációs egység bővítése**: jelzőlámpák, fontosabb közlekedési táblák, a parkoló autók forgalomba állásának implementálása.

Az előző két pontban vázolt tevékenységek teljesítése kb. 3 hónapos munkát vesz igénybe városrészenként. A fejlesztés alatt a rendszer flexibilitása alapvető szempontként szerepelt a munkatervben. Így a projekt eredményeként elkészült közlekedés informatikai szoftver nagy hatékonysággal vehető igénybe bármely város közlekedési helyzetének optimalizálása, a helyben élők és dolgozók életminőségének számottevő javítása érdekében.